

# イナート粒度がコークス強度に及ぼす影響

窪田 征弘\*・野村 誠治\*・有馬 孝\*・加藤 健次\*

Effect of Inert Size on Coke Strength

Yukihiro KUBOTA, Seiji NOMURA, Takashi ARIMA and Kenji KATO

**Synopsis :** In order to improve coke strength by technique of coal size control, it is essential to understand relationship between inert size and coke strength. The size and area of inert in coke was measured with a microscope and an image analysis technique and the effect of inert size on coke strength was investigated. Moreover the reason why  $DI^{150}_{-6}$  leveled off at inert size of 1.5 mm was investigated.

The results are follows.

- (1) When the inert size is between about 1.5 mm and 5 mm, surface breakage product ( $DI^{150}_{-6}$ ) decreases as the size of inert in coke becomes smaller. When the inert size is over about 5.0 mm, volume breakage product ( $DI^{150}_{6-15}$ ) decreases as the inert size becomes smaller.
- (2) The effect of 1% inert in coke on  $DI^{150}_{-6}$  and  $DI^{150}_{6-15}$  was clarified.
- (3) According to Hertzian contact theory and Griffith equation, it is estimated that the crack under 0.5 mm doesn't grow by fall of coke in drum tester. Critical inert size (1.5 mm) is appropriate values for this critical crack size (0.5 mm), because size of the crack around inert particle is equal to the inert size or is smaller than it.

**Key words:** coke; coal; coke strength; inert size; image analysis; tensile stress; crack; Griffith equation; Hertzian contact theory.

## 1. 緒言

現在、我が国の高炉操業は、CO<sub>2</sub>削減および高生産への対応から、低還元材比・高出銑比操業へシフトしつつある。低還元材比を指向する際、高炉内のコークス粉の蓄積が懸念され、高出銑比になればこの傾向がさらに助長されることが指摘されている<sup>1,2)</sup>。耐粉化性に優れた高強度コークスの製造技術の開発は、高炉の低還元材比・高出銑比操業を達成するために極めて重要な課題である。

高強度コークスの製造技術には、既に多くの開発例があるが<sup>3-6)</sup>、その一つに石炭粉碎粒度の制御技術がある<sup>7,8)</sup>。一般的に、コークス炉に装入する石炭を細かく粉碎するほどコークス強度は向上する。しかし、過粉碎すると、コークス炉内での石炭の装入密度低下による装入量低下とコークス強度低下、さらには微粉由来のキャリオーバー増加など、操業に悪影響を及ぼす。よって、石炭の細粒化は最低限に止め、効率よくコークス強度を向上させる必要がある。

石炭粉碎によるコークス強度向上の理由は、主に石炭中のイナーチニット組織（以下、単にイナートと略記）のサイズ低下によるものと考えられている<sup>7,8)</sup>。過粉碎を防ぎつつコークス強度を向上させるためには、イナートサイズとコークス強度の関係を精緻に把握することが重要である。

美浦らは、粉碎粒度の異なるイナート濃縮炭を一定の比

率で配合し、イナート濃縮炭の粉碎粒度とコークス強度の関係について報告している<sup>8)</sup>。朝田らは0.25 mm未満および0.5~1.0 mmに粒度調整したイナート濃縮炭を一定の比率で配合し、イナート濃縮炭の粒度とコークス強度（発生粉率）との関係について報告している<sup>9)</sup>。これらの報告では、あくまでもイナート濃縮炭の粒度とコークス強度との関係について述べているのみであり、イナートのサイズを実際に測定し、イナートサイズとコークス強度の関係を直接的に評価した例ではない。現時点では、イナートサイズとコークス強度の関係が必ずしも解明されているとはいえない。

そこで、本報告では、0.1~0.3 mm, 0.3~0.6 mm, 0.6~1.2 mm, 2.0~4.0 mm, 5.0~7.0 mm, および10~15 mmの粒度フラクションに調整したイナート濃縮炭を一定比率配合してコークスを製造し、コークス顕微鏡写真の画像解析によりイナートサイズを実際に測定し、イナートサイズがコークス強度（ドラム強度指数 $DI^{150}_{-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$ ）に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 石炭試料

Fig. 1に、イナート濃縮炭の作成方法を示す。まずA炭（トータルイナート：35.6%）の原炭を15 mmの篩で篩分

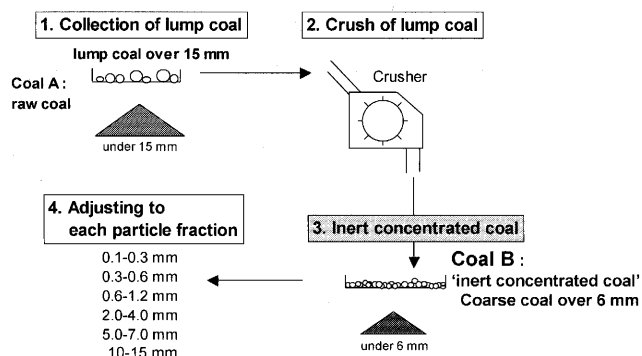


Fig. 1. Preparation procedure of inert concentrated coal.

Table 1. Characterization of the coals used.

	Proximate analysis (db.) (mass%)		Total dilatation (vol.%)	Maximum fluidity (log MF/ddpm)
	ASH	VM		
Coal A	8.6	24.7	114	2.78
Coal B	14.9	20.7	0	0.30

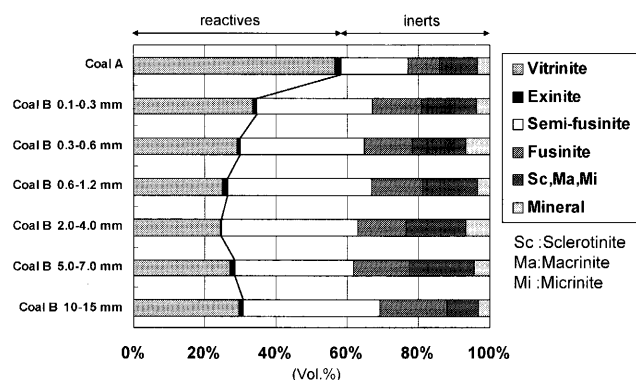


Fig. 2. Maceral components of the coals used.

けた。篩上の塊炭を粉砕機で一次粉砕し、粉砕後試料をさらに6mmで篩った。今後、この6mm以上の石炭をB炭(イナー特濃縮炭)と呼ぶ。

次に、微細組織成分(マセラル)は同じで、粒度のみ異なるイナー特濃縮炭を作成するため、B炭を0.1~0.3mm, 0.3~0.6mm, 0.6~1.2mm, 2.0~4.0mm, 5.0~7.0mm, および10~15mmの粒度フラクションに調整した。各フラクションの組織成分を同一にする目的で、乳鉢を用いてB炭を弱粉砕し、フラクション未満の粉の発生を極力抑制しつつ粒度調整を行った。なお10~15mmの試料については、6mm以上のB炭をさらに10mmで篩い、篩上留分を10~15mmに調整して作成した。

A炭およびB炭の工業分析値、全膨張率および最高流動度をTable 1に示す。B炭は、A炭に比べ揮発分は低く、灰分についても濃縮されている。また、B炭は膨張性および流動性をほとんど示さない。Fig. 2にA炭B炭の微細組織成分(マセラル)の比率を示す。B炭は原炭であるA炭に

Table 2. Blending ratio and coal size condition.

No.	Blending ratio (mass.%)		Coal size (mm)	
	Coal A	Coal B	Coal A	Coal B
1	100	0	-1.5	-
2	85	15	-1.5	0.1-0.3
3	85	15	-1.5	0.3-0.6
4	85	15	-1.5	0.6-1.2
5	85	15	-1.5	2.0-4.0
6	85	15	-1.5	5.0-7.0
7	85	15	-1.5	10-15

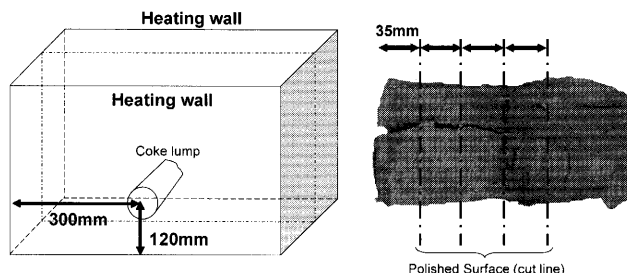


Fig. 3. Position of coke lump picked up and polished surface for microscopic analysis.

くらべ著しくイナー特が濃縮されていること、またB炭の組織成分は各フラクションで大差ないことを確認した。

## 2.2 コークスの製造方法

### 2.2.1 試験条件

Table 2に試験条件を示す。No. 1の条件では、1.5mm未満に粉砕したA炭を単味でコークス化した。No. 2~7の条件では、各粒度に調整されたB炭を15%配合してコークス化した。

### 2.2.2 乾留条件

石炭を幅420mm、高さ400mm、長さ600mmの両面電気加熱炉によって18.5時間乾留し、コークスを製造した。電気発熱体の温度は、実炉のフリー温度1250°Cでの炭中ヒートパターンに合うように調整した。また、装入炭水分は3%、装入密度は乾炭基準0.85t/m<sup>3</sup>とした。乾留後の赤熱コークスは、N<sub>2</sub>雰囲気中で常温まで冷却した。

### 2.3 コークスの分析

冷却後のコークスケーキから、Fig. 3に示す位置のコークス塊を採取した。採取したコークスを加熱壁に対して平行に35mm間隔で切断し、4つの切断面を樹脂埋めおよび研磨した。1つの研磨面につき、18.5mm×14.5mmの顕微鏡写真を2枚、合計8枚を作成した。

撮影したコークス顕微鏡写真からコークス中のイナー特を目視で判別してマーキングし、イナー特粒度分布を市販の画像解析ソフトにより測定した。一例として、Fig. 4(a), (b)にNo. 5コークスのイナー特マーキング前後の顕微鏡写真を示す。濃い灰色の部分が気孔、薄い灰色の部分がコークス壁、白く塗りつぶした部分がイナー特である。

また、冷却後のコークスは、シャッター試験機で2mの落下衝撃を3回与えた後、コークスのドラム強度指数(JIS

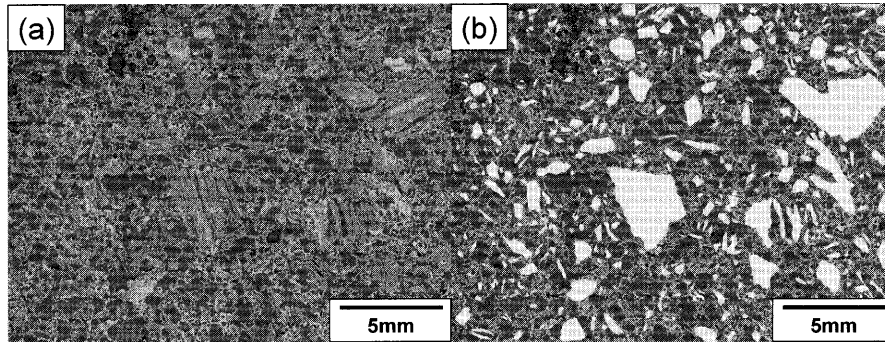


Fig. 4. Photographs of No. 5 coke (a) before inert marking and (b) after inert marking.

K 2151)を測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 イナー濃縮炭粒度とドラム強度指数の関係

Fig. 5にB炭（イナー濃縮炭）の粒度とドラム強度指数  $DI^{150}_{15}$  の関係を示す。横軸のB炭の粒度は、各フラクションの中間値とした。Fig. 5に示すように、B炭を細粒化するほど  $DI^{150}_{15}$  は向上するが、1mm未満では  $DI^{150}_{15}$  が向上しないことが分かる。

Fig. 6(a), (b)に、B炭の粒度とドラム試験により発生した6mm未満の粉率 ( $DI^{150}_{-6}$ )、および6~15mmの粉率 ( $DI^{150}_{6-15}$ ) との関係を示す。ここで、 $DI^{150}_{-6}$  と  $DI^{150}_{6-15}$  は、それぞれ表面破壊生成物、体積破壊生成物と考えられ<sup>10)</sup>、 $DI^{150}_{15}$  との関係は下式で表せる。

$$DI^{150}_{15} = 100 - (DI^{150}_{-6} + DI^{150}_{6-15}) \dots\dots\dots(1)$$

Fig. 6(a), (b)に示すように、B炭の細粒化によって  $DI^{150}_{-6}$  が低減する粒度領域は1~6mm、 $DI^{150}_{6-15}$  が低減する粒度領域は3mm以上である。これらの結果から、それぞれの粉率低下に有効な粒度領域が異なることが分かる。

#### 3.2 コークス中のイナー粒度分布

Fig. 7(a)にコークス顕微鏡写真の画像解析によって求めたコークス中のイナーの粒度分布を示す。横軸のイナー粒度は、絶対最大長（イナーの輪郭線上における任意の2点間の距離の最大値）とした。縦軸のイナー比率は、解析画像の全面積に対する各粒度のイナーの面積率とした。また、Fig. 7(b)にコークス中のB炭由来のイナー粒度分布を示す。コークス中のB炭由来のイナー粒度分布は、No. 2~7コークスのイナー粒度分布からNo. 1（A炭比率100%、1.5mm未満に粉砕）コークスのイナー粒度分布の85%分を差し引いて求めた。

Fig. 7(b)に示すように、各コークス中のB炭由来のイナー粒度分布のピークは、それぞれ添加したB炭の粒度範囲にほぼ存在することが分かる。

Fig. 8には、B炭由来のコークス中イナーの合計比率を示す。B炭由来のコークス中イナーの合計比率は、

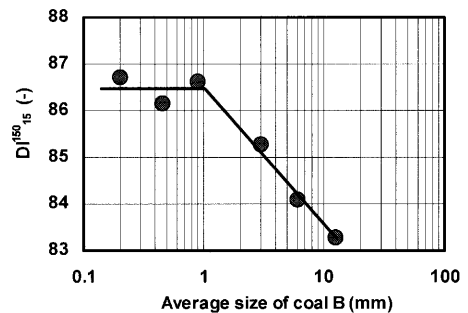


Fig. 5. Relationship between average size of coal B and  $DI^{150}_{15}$ .

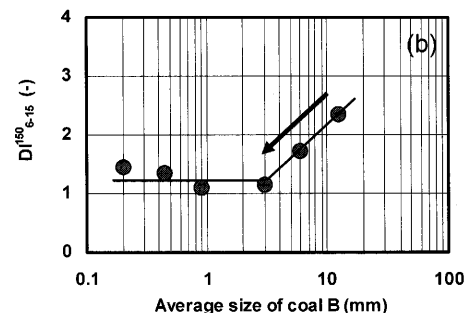
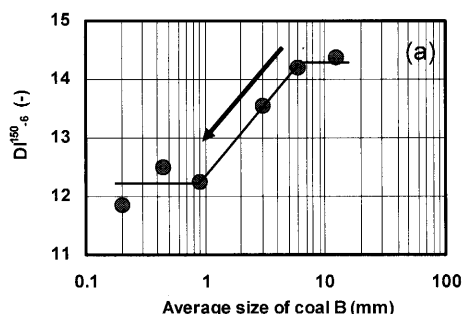


Fig. 6. Relationship between average size of coal B and (a)  $DI^{150}_{-6}$ , (b)  $DI^{150}_{6-15}$ .

No. 5~7のコークスでは約10%、No. 2~4のコークスでは3~5%である。

各条件のB炭配合比率は15%一定であるため、本来B炭由来のコークス中イナーの合計比率も同等になるべきである。しかしながら、上述のように、各条件で差が生じた原因は以下のように考えられる。

Fig. 2の石炭微細組織成分の分析値からB炭のトータル

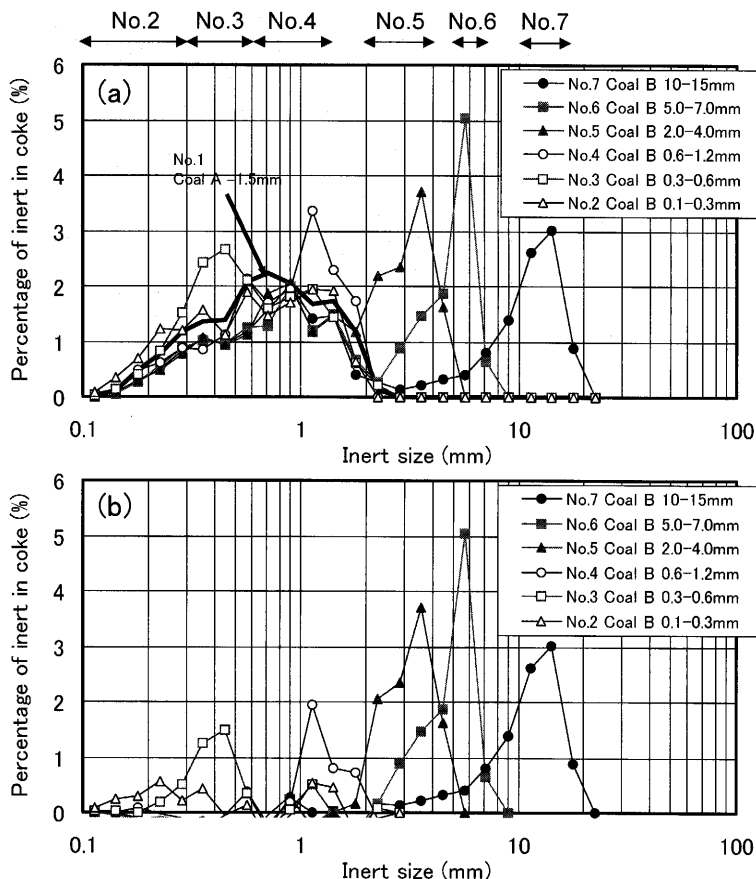


Fig. 7. Size distribution of (a) all inert in coke and (b) inert of Coal B in coke.

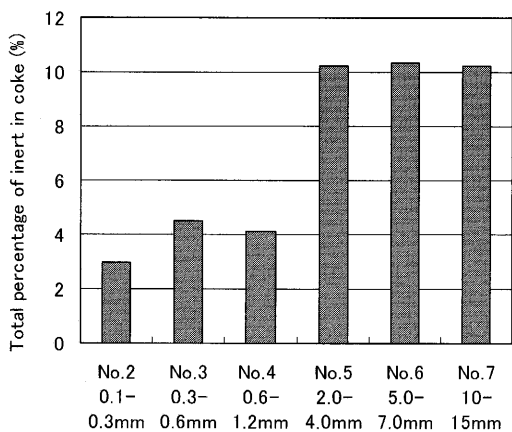


Fig. 8. Total percentage of inert of Coal B in coke.

イナートは約58%と計算される。B炭由来のコークス中イナートの合計比率は、これにB炭配合比率15%を掛け、約9%と推算される。No. 5~7では、この推算値とコークス顕微鏡写真の画像解析による実測値がほぼ一致する。よって、No. 5~7のコークス中のイナート、即ち約1.5 mm以上のイナートは定量的に測定できていると考えられる。

一方、No. 2~4は、石炭微細組織成分の分析値からの推算値(約10%)よりもコークス顕微鏡写真の画像解析による実測値(3~5%)の方が小さい。よって、No. 2~4のコークス中のイナート、即ち約1.5 mm未満のコークス中イ

ナートは、定量的に測定できていないと考えられる。この理由は、約1.5 mm未満の微小なイナートは気孔壁中に取り込まれるため目視による組織の判別が難しく、イナートのマーキングが不十分であったためと考えられる。

以上より、今回のコークス顕微鏡写真の画像解析では、少なくとも約1.5 mm以上のコークス中イナートは定量化できていると考えられる。

#### 4. 考察

##### 4.1 イナート粒度がコークス強度に及ぼす影響

本節では、まずドラム強度指数(DI<sup>150</sup><sub>-6</sub>, DI<sup>150</sup><sub>6-15</sub>)に影響を及ぼすコークス中イナートの粒度範囲について検討する。また、コークス中のイナート粒度分布を所定の粒度区分に区切り、各区分のイナート1%当たりのドラム強度指数(DI<sup>150</sup><sub>-6</sub>, DI<sup>150</sup><sub>6-15</sub>)への影響についても検討する。

##### (1) ドラム強度指数に影響を及ぼすコークス中イナートの粒度範囲

Fig. 6よりNo. 2~4 およびNo. 6~7のDI<sup>150</sup><sub>-6</sub>はほぼ一定である。よって、Fig. 7(b)より約1.5 mm未満および約5.0 mm以上の領域でイナートサイズが変化しても、DI<sup>150</sup><sub>-6</sub>への影響は小さいと考えられる。また、Fig. 6よりNo. 2~5のDI<sup>150</sup><sub>6-15</sub>はほぼ一定であるため、Fig. 7(b)より約

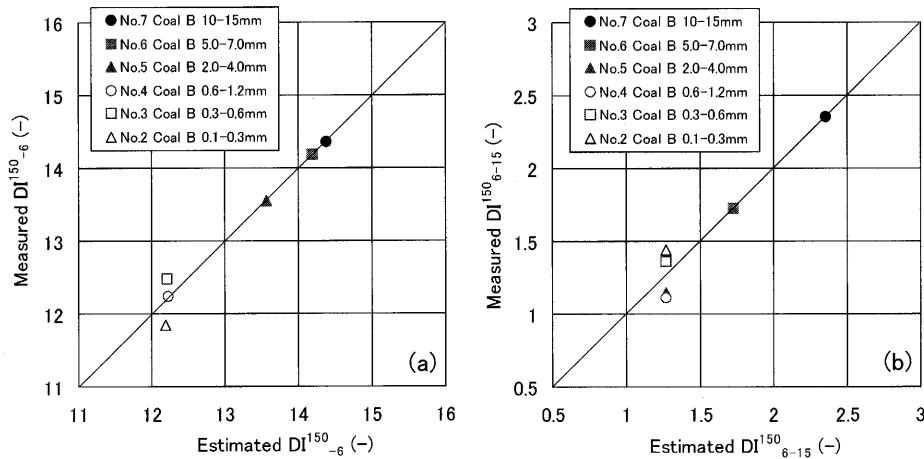


Fig. 9. (a) Relationship between estimated  $DI^{150}_{6-6}$  and measured  $DI^{150}_{6-6}$ , (b) Relationship between estimated  $DI^{150}_{6-15}$  and measured  $DI^{150}_{6-15}$ .

5.0 mm 未満の領域でイナートサイズが変化しても、 $DI^{150}_{6-15}$  への影響は小さいと考えられる。

以上より、表面破壊生成物  $DI^{150}_{6-6}$  は、約 1.5~5 mm の粒度領域でイナートが細粒化されると低減すると考えられる。しかし、1.5 mm 未満の領域もしくは 5.0 mm 以上の粒度領域でイナートが細粒化されても、 $DI^{150}_{6-6}$  は変化しないと考えられる。一方、体積破壊生成物  $DI^{150}_{6-15}$  は、5.0 mm 以上の粒度領域でイナートが細粒化されると低減し、5.0 mm 未満の粒度領域でイナートが細粒化されても変化しないと考えられる。

(2) 各粒度区分のイナート 1% 当たりのドラム強度指数 ( $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$ ) への影響

まず、Fig. 7(b) の各コークス中のイナート粒度分布から、解析画像の全面積に対する  $1.6(10^{0.2})\sim 3.2(10^{0.5})$  mm,  $3.2\sim 5.0(10^{0.7})$  mm,  $5.0\sim 10$  mm, および 10 mm 以上のイナート比率を求めた。

次に、全てのコークスについてイナート以外の欠陥は差がなく、各粒度区分のイナートの  $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$  への影響について加成性が成り立つと仮定し、式(2)および(3)に示すような  $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$  の推算式が成り立つと考えた。

$$DI^{150}_{6-6}(-) = a \times \{1.6\sim 3.2 \text{ mm-}\%\} + b \times \{3.2\sim 5.0 \text{ mm-}\%\} + c \times \{+5.0 \text{ mm-}\%\} + e \dots \dots \dots (2)$$

$$DI^{150}_{6-15}(-) = c' \times \{5.0\sim 10 \text{ mm-}\%\} + d' \times \{+10 \text{ mm-}\%\} + e' \dots \dots \dots (3)$$

ここで、{ } 内は各粒度区分のイナート比率(%)を示す。係数  $a\sim c$ ,  $c'\sim d'$  は、各区分のイナート 1% 当たりの  $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$  への影響度である。定数  $e$  は、No. 2~4 の  $DI^{150}_{6-6}$  の平均値(12.19)、定数  $e'$  は、No. 2~5 の  $DI^{150}_{6-15}$  の平均値(1.27)とした。

最後に、最小二乗法による回帰分析によって、式(2), (3)による推算  $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$  と、実測  $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$  の

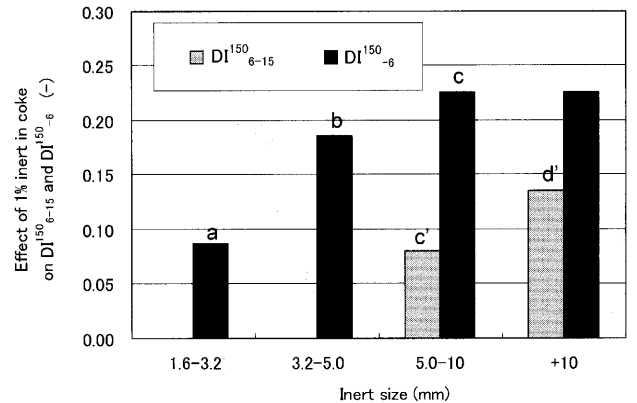


Fig. 10. Effect of 1% inert in coke on  $DI^{150}_{6-6}$  and  $DI^{150}_{6-15}$ .

相関が最も高くなる係数  $a\sim c$ ,  $c'\sim d'$ 、即ち各区分のイナート 1% 当たりの  $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$  への影響度を求めた。

Fig. 9(a), (b) に  $DI^{150}_{6-6}$  および  $DI^{150}_{6-15}$  の推算値と実測値の比較、Fig.10 に各粒度区分のイナート 1% 当たりの  $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$  の影響度を示す。イナート 1% 当たりの  $DI^{150}_{6-6}$  への影響度は、イナートサイズ 1.6~3.2 mm では 0.09 ポイント、3.2~5.0 mm では 0.19 ポイント、5.0 mm 以上では 0.23 ポイントと推算される。イナート 1% 当たりの  $DI^{150}_{6-15}$  への影響度は、イナートサイズ 5.0~10 mm では 0.08 ポイント、10 mm 以上では 0.13 ポイントと推算される。

以上、コークス顕微鏡写真の画像解析によりコークス中のイナートサイズを実際に測定し、各粒度区分のイナート 1% 当たりのコークス強度 ( $DI^{150}_{6-6}$ ,  $DI^{150}_{6-15}$ ) への影響度について明らかにした。

#### 4.2 臨界イナート径

4.1 節より、イナートを約 1.5 mm 未満に細粒化しても  $DI^{150}_{6-6}$  は低減しないことが分かった。ここでは、これ以上細粒化しても  $DI^{150}_{6-6}$  の低減しないイナート粒度を臨界イナート径と定義し、臨界イナート径が 1.5 mm 程度である理由について考察した。

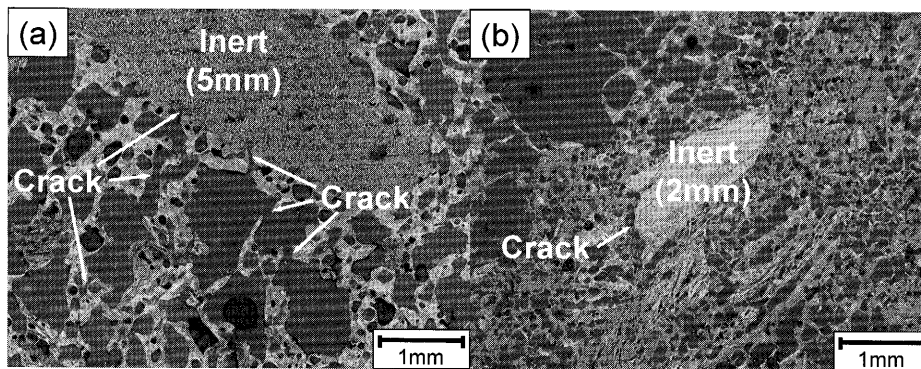


Fig. 11. (a) Crack radially generated from inert and (b) Crack around inert.

4・2・1 イナート周辺に生成する亀裂

西村らは、イナートおよびビトリニットの組織成分間の収縮挙動が異なることを示し、各組織成分界面における亀裂発生の原因になることを示唆している<sup>11)</sup>。また、Davidgeらは、収縮挙動の異なる粒子周囲には粒子径相当の亀裂が発生すること、亀裂寸法は粒子径に比例して変化することを報告している<sup>12)</sup>。Fig.11(a), (b)に、イナート周辺に発生した亀裂を示した顕微鏡写真を示す。Fig. 11(a)はフジツ状構造のイナート粒子から放射線上に発生する亀裂、Fig.11(b)はイナート粒子周囲の剥離によって発生した亀裂である。このような亀裂の寸法はイナートの細粒化に伴い低下すると考えられる。

亀裂の寸法および発生位置は、イナートと周辺組織の収縮率差や接着性、周辺組織の弾性係数等によって異なると予想される。しかしながら、亀裂は三次元的に発生するため、二次元断面では亀裂寸法の定量的測定が困難である。イナート周辺亀裂の定量的測定は今後の課題であるが、顕微鏡による定性的観察では、イナート周辺亀裂の寸法はイナート粒度（絶対長）に対して同程度、あるいはそれよりも小さい場合が多い。すなわち、イナート径≧イナート周辺亀裂の寸法であると考えられる。

さて、コークスのような脆性体の強度に関して、長さ2cの亀裂が存在する場合の平面引張応力状態におけるGriffithの破壊条件式は次式で与えられる<sup>13)</sup>。

$$K = \sigma \sqrt{\pi c} \dots\dots\dots (4)$$

$K$  [Pa・m<sup>1/2</sup>]は破壊靱性値、 $\sigma$  [Pa]は引張応力、 $c$  [m]は亀裂半長である。(4)式は、亀裂が進展を開始する応力および亀裂寸法の臨界値(以下、臨界亀裂寸法と定義)を予測する式である。右辺の $\sigma \sqrt{\pi c}$ が、左辺の $K$ の値に達したとき、亀裂は進展する。ここで、イナート近辺の亀裂に対し局所的にGriffithの破壊条件式が成り立つと仮定すると、コークスの破壊靱性値 $K$ およびコークスに作用する引張応力 $\sigma$ から、臨界亀裂寸法 $2c$ を求めることができる。

4・2・2 コークスに作用する引張応力分布

ここでは、ドラム試験によってコークスに作用する引張

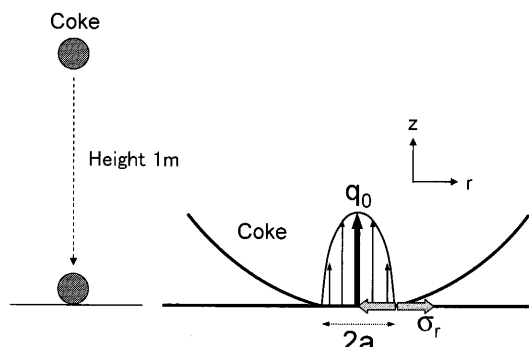


Fig. 12. Compressive pressure effecting on the center and tensile stress effecting on the circular boundary of the surface of contact.

応力の分布について推算する。ドラム試験におけるコークスの破壊は、主にコークスとドラム試験機の鉄板との衝突により起こると考えられる。その際コークスに作用する応力として、接触面に発生する圧縮応力、塊内部に作用する剪断応力、および接触面の境界付近の表面に作用する引張応力が挙げられる<sup>14)</sup>。コークスのような脆性材料の破壊は、主に引張応力によって起こると考えられているため<sup>14)</sup>、ここでは塊表面に作用する引張応力がコークスの破壊に寄与すると仮定する(接触面中心に作用する圧縮応力は、接触面の円周境界付近に作用する引張応力に比べ約10倍大きい。しかし、応力状態は静水圧に近く(主応力のすべて圧縮方向)、亀裂進展に関しては寄与が小さいと考えられる<sup>15)</sup>。但し、接触面のコークス壁の凹凸から、数十~数百μmオーダーの細かい粉が発生する可能性がある)。

ここで、ドラム試験機内でのコークスの落下を想定し、Fig.12に示すように直径50mmの球形コークスが1m下の鉄板と衝突するケースを考え、Hertzの接触理論<sup>14),16)</sup>から塊表面に作用する引張応力の分布を算出する。なお、鉄板に対し水平方向を $r$ 軸、垂直方向を $z$ 軸とする。

コークスに作用する荷重 $P$  [N]とコークスの変形量 $\delta$  [m]との間には、Hertzの接触理論によると次式の関係が成立する。

$$P=A\delta^{3/2} \dots\dots\dots(5)$$

$$A=\frac{2\sqrt{2}}{3}\left(\frac{1-\nu_1^2}{Y_1}+\frac{1-\nu_2^2}{Y_2}\right)^{-1} dp^{1/2}$$

ここで、 $Y$  [N/m<sup>2</sup>]と $\nu$ [-]はそれぞれヤング率とポアソン比である。添え字1および2はそれぞれコークスと鉄板を表す。 $dp$  [m]はコークスの直径である。

落下時におけるコークスのポテンシャルエネルギー  $E$  [N・m]がコークスの弾性ひずみエネルギーに転換されるものとすれば、次式の関係が成り立つ。

$$\eta \times E = \int_0^{\delta_{\max}} Pd\delta \dots\dots\dots(6)$$

$\eta$  [-]はエネルギーの伝達の度合いを表す値であり、歪みエネルギーへの転換が完全に行われる場合には、 $\eta=1$ と考える事ができる。

(5)と(6)の式より(7)が導かれる。

$$P=c_1\eta^{3/5}E^{3/5}dp^{0.2} \dots\dots\dots(7)$$

$$c_1=\left(\frac{5}{2}\right)^{3/5}\left\{\frac{2\sqrt{2}}{3}\left(\frac{1-\nu_1^2}{Y_1}+\frac{1-\nu_2^2}{Y_2}\right)^{-1}\right\}^{2/5}$$

式(7)に $\eta=1$ 、コークス落下時のポテンシャルエネルギー  $E=0.64\text{N}\cdot\text{m}$ 、コークスのみかけヤング率  $Y_1=1.5\times 10^9$  N/m<sup>2</sup><sup>18)</sup>、ポアソン比  $\nu_1=0.3$ 、および鉄板のヤング率  $Y_2=2.1\times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>、ポアソン比  $\nu_2=0.3$ を代入すると、コークスに作用する圧縮荷重  $P$ は約3400Nとなる。

さて、Hertzの接触理論によると接触面の半径  $a$  [m]および変形量  $\delta$  [m]は、下記の式で表される。

$$a=\sqrt[3]{\frac{3\pi}{4}P(k_1+k_2)R} \dots\dots\dots(8)$$

$$\delta=\sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{16}\frac{P^2(k_1+k_2)^2}{R}} \dots\dots\dots(9)$$

$$k_1=\frac{1-\nu_1^2}{\pi Y_1} \quad k_2=\frac{1-\nu_2^2}{\pi Y_2}$$

これらの式に、圧縮荷重  $P$  [N]、コークスの半径  $R$  [m]、上述のヤング率  $Y_1, Y_2$  [N/m<sup>2</sup>]、ポアソン比  $\nu_1, \nu_2$  [-]の値を代入すると、変形量  $\delta$ は0.46 mm、接触面の半径  $a$ は3.42 mmとなる。

接触面の中心に作用する最大圧縮応力  $q_0$  [Pa]および接触面の円周境界付近に作用する最大引張応力  $\sigma_r$  [Pa]はHertzの接触理論によると下式で表される。

$$q_0=\frac{3P}{2\pi a^2} \dots\dots\dots(10)$$

$$\sigma_r=\frac{1-2\nu}{3}q_0 \dots\dots\dots(11)$$

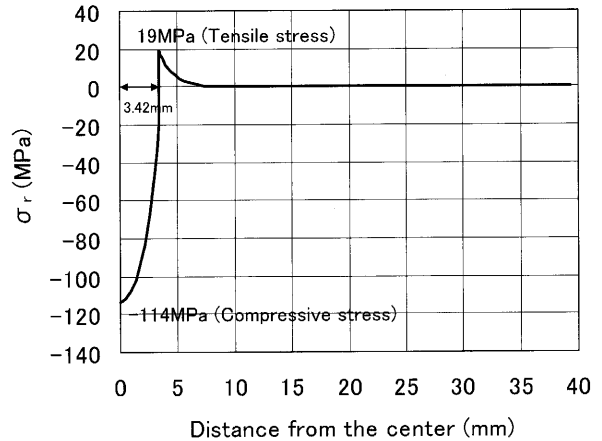


Fig. 13. Distribution of the  $r$ -direction stress effecting on the surface of coke.

この結果、接触面の中心に作用するZ方向の最大圧縮応力  $q_0$ は142 MPa、接触面の円周境界に作用する  $r$ 方向の最大引張応力  $\sigma_r$ は19 MPaと計算される。なお、コークス粒度  $dp$ が変化しても、圧縮荷重  $P$ の変化とともに接触面の半径  $a$ も変化するため、最大圧縮応力  $q_0$ 、最大引張応力  $\sigma_r$ は変化しない。

次に、文献<sup>15)</sup>に記載されている球体の点接触における球表面での応力分布を参考にして、コークス塊表面における  $r$ 方向の応力分布を求めた。その結果をFig.13に示す。横軸は、接触面の中心点からコークス塊表面上の任意の点までの距離である。縦軸は、 $r$ 方向の応力であり、負は圧縮方向、正は引張方向である。Fig.13から、接触面内では最大114 MPaの圧縮応力が作用すること、接触面の円周境界付近に最大19 MPaの  $r$ 方向の引張応力が作用すること、また引張応力は接触面から離れるにつれて漸減することが分かる。

#### 4.2.3 臨界イナート径

Fig.14(a), (b)に、接触面円周境界近傍でのコークス塊表面における引張応力  $\sigma_r$ および臨界亀裂寸法  $2c$ の分布を示す。 $2c$ の分布は、(4)式のGriffithの破壊条件式に、4.2.2項で求めた引張応力  $\sigma_r$ の分布、コークスの破壊靱性値  $K=0.5\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ <sup>17)</sup>を代入して算出した。

例えば、Fig.14(b)において、接触面中心から5 mmの塊表面にて、6 mm以上の亀裂 ( $r$ 軸および  $z$ 軸の両方に対して垂直な亀裂)が存在する場合、亀裂は進展する。一方、6 mm未満の亀裂が存在しても、亀裂は進展しない。即ち、Fig.14(b)において、 $2c$ の曲線よりも上では亀裂が進展し、下では進展しないと考えることができる。

Fig.14(b)からは、以下の2点が考察される。

- 1) イナート細粒化に伴い亀裂の寸法が低下すれば、亀裂の進展する領域は、より接触面に近い範囲に限定される。そのため、亀裂の進展する確率が低下し、コークス強度は向上すると考えられる。

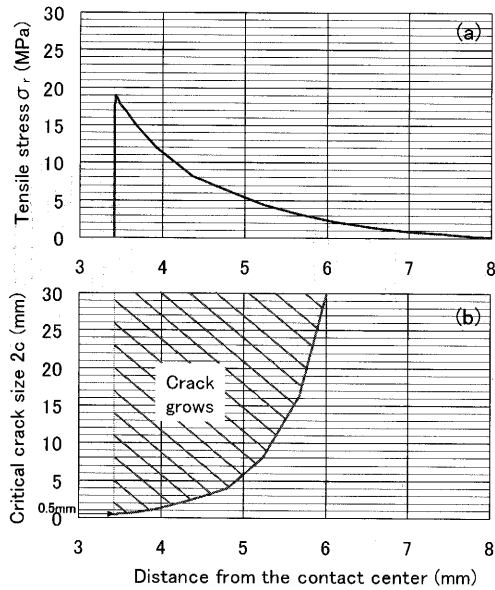


Fig. 14. Distribution of (a) the tensile stress effecting on the surface of coke and (b) the critical size of crack.

2) 最大引張応力の発生する接触円周境界において、最小の臨界亀裂寸法は約0.5 mmである。即ち、ドラム試験機内のコークスの落下では、約0.5 mm未満の亀裂は進展しないと推察される。4・2・1節で述べたように、イナート周辺に発生する亀裂寸法はイナート寸法と同等かあるいはそれ以下であることを考慮すると、最小臨界亀裂寸法0.5 mmに対し、臨界イナート径1.5 mmは妥当な値であると考えられる。

### 5. 結言

コークス中のイナート粒度を顕微鏡写真の画像解析によって測定し、イナート粒度がコークス強度（ドラム強度指数  $DI_{-6}^{150}$ ,  $DI_{6-15}^{150}$ ）に及ぼす影響について検討した。また、イナートを細粒化しても  $DI_{-6}^{150}$  の低減しない粒度（臨界イナート径）が1.5 mm程度である理由について検討した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 表面破壊生成物  $DI_{-6}^{150}$  は、1.5~5 mmの粒度領域でイナートが細粒化されると低減する。体積破壊生成物  $DI_{6-15}^{150}$  は、5.0 mm以上の粒度領域でイナートが細粒化されると低減する。

(2) (1)で示した  $DI_{-6}^{150}$ ,  $DI_{6-15}^{150}$  の低減するイナート粒度領域において、コークス中イナート1%当たりの  $DI_{-6}^{150}$ ,  $DI_{6-15}^{150}$  への影響度について明らかにした。

(3) ヘルツの接触理論およびグリフィスの破壊条件式より、ドラム試験機内のコークスの落下では0.5 mm未満の亀裂は進展しないと推定される。イナート周辺に発生する亀裂寸法は、イナート寸法と同等かあるいはそれ以下であることを考慮すると、この臨界亀裂寸法0.5 mmに対し、臨界イナート径1.5 mmは妥当な値であると考えられる。

### 文 献

- 1) K.Yamaguchi, T.Uno, T.Yamamoto, H.Ueno, N.Konno and S.Matsuzaki: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 641.
- 2) T.Ariyama, M.Sato, T.Sato, S.Watakabe, and R.Murai: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 114.
- 3) H.Jo and S.Ida: *Tetsu-to-Hagané*, **42** (1956), 226.
- 4) M.Yokomizo, M.Fukunaga, Y.Nakagawa and T.Iguchi: Proc. of 6th Int. Iron and Steel Cong., ISIJ, Tokyo, (1990), 274.
- 5) Y.Nakashima, S.Mochizuki, S.Ito, K.Nakagawa, K.Nishimoto and K.Kobayashi: Proc. of 2nd Int. Cokemaking Cong., TIM., London, (1992), 518.
- 6) K.Nishioka: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 614.
- 7) C.Abramoskii: *Glückauf*, **91** (1955), 714.
- 8) Y.Miura, T.Yamaguchi, T.Nishi and Y.Yone: *J. Fuel Soc. Jpn.*, **60** (1981), 771.
- 9) S.Asada, M.Nishimura and T.Nojima: *J. Jpn. Inst. Energy*, **73** (1994), 1060.
- 10) T.Arima: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 274.
- 11) M.Nishimura and S.Asada: *Coke Circular*, **43** (1994), 133.
- 12) R.W.Davidge and T.J.Green: *J. Mater. Sci.*, **3** (1968), 629.
- 13) C.R.Barrett, W.D.Nix, A.S.Tetelman 著, 岡村弘之, 井形直弘, 堂山昌男訳: 材料科学2, 培風館, 東京, (1980), 98.
- 14) S.Timoshenko and J.N.Goodier: *Theory of Elasticity*, McGrae-Hill, (1951), 372.
- 15) 山本雄二, 兼田楨宏著: トライボロジー, 理工学社, 東京, (1998), 28.
- 16) Y.Kuwahara, F.Saito and S.Yashima: *J. Soc. Powder Technol. (Jpn.)*, **19** (1982), 157.
- 17) M.Sakai, R.Nishimura, M.Nishimura and K.Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 164.